

بررسی خطای تخمین موقعیت جسم با استفاده از دو حسگر بردار صوتی

ابوالفضل حسنی بافرانی	مرتضی شهروی	عباس رهی*	امیرحسین عرب
استادیار	دانشیار	استادیار	دانشجوی کارشناسی ارشد
دانشکده مهندسی مکانیک	دانشکده مهندسی مکانیک و	دانشکده مهندسی مکانیک و	دانشکده مهندسی مکانیک و
دانشگاه تفرش	انرژی	انرژی	انرژی
	دانشگاه شهید بهشتی	دانشگاه شهید بهشتی	دانشگاه شهید بهشتی
baferani@tafreshu.ac.ir	m_shahravi@sbu.ac.ir	a_rahi@sbu.ac.ir	am.arab@mail.sbu.ac.ir

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۲/۰۴/۱۰

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۰۲/۲۳

چکیده

هدف این مقاله تخمین موقعیت منابع صوتی است. روش پیشنهادی از دو حسگر بردار صوتی استفاده می‌کند به این صورت که تقاطع پرتوهای هر حسگر بردار صوتی (AVS) که از زاویه آزمایش آنها به دست می‌آید، موقعیت یک منبع را نشان دهد. از آنجایی که در عمل منبع‌های صوتی غیرنقطه‌ای هستند پس تخمین موقعیت با استفاده از این روش، بیانگر مساحت ناحیه‌ای است که احتمال حضور منبع صدا در آن وجود دارد. در این مقاله، تأثیر پارامترهای مختلف بر خطای تخمین موقعیت منبع صوتی بررسی می‌شود. یکی از مهم‌ترین پارامترها، زاویه چرخش منبع صوتی است. نتایج به دست آمده نشان می‌دهد که خطای تخمین موقعیت تحت چه شرایط و پارامترهایی چگونه تغییر می‌کند. این موضوع کمک می‌کند که بهترین شرایط برای تخمین موقعیت منبع صوتی با کمترین خطا ارائه شود. خطا در تخمین موقعیت به اندازه منبع صوتی، فاصله منبع تا AVSها، فاصله دو حسگر از یکدیگر و زاویه منبع نسبت به حسگرها بستگی دارد. روش پیشنهادی در شناسایی منابع صوتی به خصوص در صنایع نظامی و تخمین موقعیت منابع صوتی متحرک مانند وسایل نقلیه جاده‌ای کاربرد دارد.

واژگان کلیدی: حسگر بردار صوتی، محلی‌سازی، مکان‌یابی، تخمین موقعیت منبع صوتی، منبع صوت غیرنقطه‌ای

۱. مقدمه

استفاده می‌شود. کاربردهای حسگر بردار صوتی^۱ (AVS) در برآورد جهت رسیدن^۲ (DoA) در سناریوهای مختلفی از جمله ردیابی و طبقه‌بندی منابع صدا [۱]، محلی‌سازی منابع صوتی متعدد [۲]، تشخیص تهدیدات امنیتی [۳]، تخمین سرعت وسایل نقلیه [۴]، هدایت خودکار دوربین به سمت گوینده [۵]،

تخمین موقعیت و محلی‌سازی منبع صدا یکی از مهم‌ترین موضوع‌های روز است که برای کاربردهای عملی همچون ردیابی منبع صدا و تشخیص تجهیزات مولد صدا استفاده می‌شود. از محلی‌سازی منبع صدا در صنایع مختلفی همچون صنایع نظامی، صنعت خودروسازی، صنایع هوافضا و غیره

سیستم‌های محلی‌سازی و نظارت بر سیستم خودرو [۶]، تشخیص هدف [۷] و ارتباطات تلفن همراه بدون هندزفری [۸] مورد تحقیق قرار گرفته است. نویسندگان در مقالات مختلفی شبکه‌بندی و پیکربندی AVS ها [۹-۱۱] و یک روش کالیبراسیون [۱۲] را پیشنهاد کردند. DoA یک سیگنال صوتی، اغلب با تجزیه و تحلیل اختلاف فاز در سیگنال‌های دریافتی توسط سیستمی از حسگرهای توزیع شده در فضا، به نام شکل‌دهنده پرتو^۳ [۱۳] انجام می‌شود. روش‌های دیگری نیز برای تخمین DoA وجود دارد که طبقه‌بندی سیگنال چندگانه^۴ (MUSIC) [۱۴] و همبستگی متقابل تعمیم یافته^۵ (GCC) [۱۵] از جمله آنها است. یک روش دیگر مبتنی بر اندازه‌گیری شدت صوت و تعیین DoA با بررسی روابط بین مقادیر شدت صوت با استفاده از حسگر بردار صوتی AVS است [۱۶]. روش شدت صوت به دلیل محاسبات کمتر و سرعت تخمین بالاتر بیشتر مورد توجه قرار گرفته است. شدت صوت یک کمیت برداری است که به فشار صوت و سرعت ذرات وابسته است [۱۷]. یک AVS می‌تواند سرعت را مستقیماً اندازه‌گیری کند که تحت عنوان پروب‌های p-u [۱۸] شناخته می‌شوند یا آن را از گرادیان فشار که به نام پروب p-p [۱۹] معروف است تخمین بزند. لازم به ذکر است که برخلاف روش شکل‌دهنده پرتو که اختلاف فاز بین سیگنال‌های فشار را اندازه‌گیری می‌کند [۲۰]، روش پیشنهادی مبتنی بر سیگنال‌های شدت است و تخمین موقعیت براساس مقادیر زاویه آزیموت^۶ که به‌طور مستقل توسط هر AVS اندازه‌گیری می‌شود. بنابراین دقت این روش با دقت تخمین DoA انجام شده توسط هر AVS و با همسویی حسگرها با یکدیگر تعیین می‌شود. با این حال، اندازه منبع صدا نیز نقش مهمی را ایفا می‌کند.

یک AVS به تنهایی قادر به اندازه‌گیری زاویه آزیموت یک منبع صوتی است. اندازه‌گیری فاصله از منبع صدا با یک AVS امکان‌پذیر نیست، بنابراین تخمین موقعیت منبع نیز قابل انجام

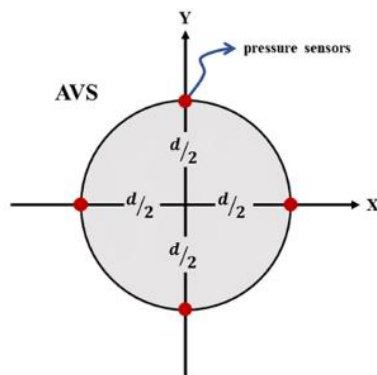
نیست. با استفاده از دو حسگر که با فاصله مشخصی از هم قرار دارند می‌توان حداقل در تئوری موقعیت منبع را با یافتن یک تقاطع بین پرتوها محاسبه کرد که این پرتوها با زاویه آزیموت اندازه‌گیری شده با هر دو حسگر تعریف می‌شود [۲۱]. در این مقاله در ابتدا به بررسی روابط حاکم بر یک حسگر بردار صوتی پرداخته شده و تعیین DoA نشان داده می‌شود. سپس نحوه تخمین موقعیت توسط دو AVS بیان شده است. در ادامه به بررسی خطا در تخمین موقعیت منبع صوت و روابط آن پرداخته شده است. در بخش بعدی نتایج عددی ارائه شده است و در انتها نیز به بحث و نتیجه‌گیری در مورد نتایج پرداخته شده است. مهم‌ترین موضوع ارائه شده در این مقاله تأثیر اندازه منبع صدا بر دقت تخمین موقعیت است.

۲. مدل‌سازی و معادلات حاکم

در این بخش روش‌ها و معادلات حاکم بر آنها بیان شده است.

۲-۱. حسگر برداری صوتی

حسگر بردار صوتی مورد بررسی در این مقاله شامل دو پروب شدت است که روی محورهای متعام سیستم مختصات قرار گرفته‌اند. هر پروب شدت یک سیستم p-p از دو حسگر فشار (میکروفون) است که روی محور در فاصله مساوی از مبدأ سیستم قرار گرفته‌اند. شماتیک AVS بیان شده در شکل ۱ قابل مشاهده است.



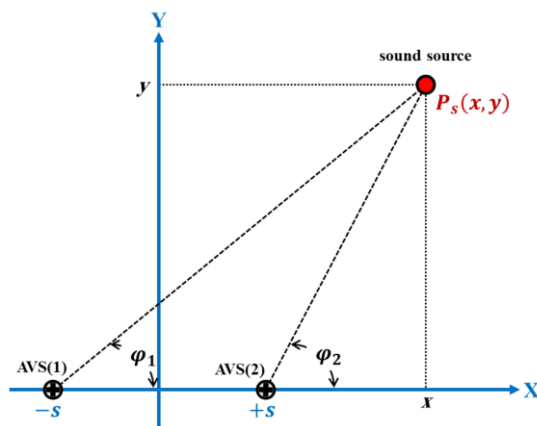
شکل ۱. شماتیک حسگر بردار صوتی متشکل از دو پروب شدت (چهار حسگر فشار) در راستای X و Y.

$$\begin{aligned} \varphi &= \tan^{-1} \left(\frac{I_Y(t)}{I_X(t)} \right) \\ &= \tan^{-1} \left(\frac{\int (\hat{p} u_Y) dt}{\int (\hat{p} u_X) dt} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

فرض شده است که فاصله d و چگالی ρ برای هر دو محور یکسان هستند بنابراین تمام عوامل ثابتی که برای محاسبه شدت استفاده می‌شوند در طول تقسیم حذف می‌شوند.

۲-۲. تخمین موقعیت منبع با استفاده از دو حسگر برداری صوتی

یک AVS به تنهایی قادر به تعیین زاویه آزیموت یک منبع صوتی است به این صورت که پرتویی را تعریف می‌کند که AVS را به منبع متصل می‌کند. با این شرط که زاویه آزیموت اندازه‌گیری شده توسط AVS دقیق باشد، با دو حسگر که با فاصله مشخص از هم قرار گرفته باشند، امکان تعیین موقعیت منبع با یافتن محل تقاطع پرتوهای هر AVS فراهم می‌شود. در شکل ۲ نحوه قرارگیری دو حسگر بردار صوتی نمایش داده شده است. دو AVS با ساختار یکسان بر روی محور X سیستم مختصات و در فاصله مساوی S از مبدأ سیستم قرار گرفته‌اند. محور X هر AVS با محور X سیستم مختصات همراستا هستند.



شکل ۲. نحوه قرارگیری دو حسگر بردار صوتی و تقاطع پرتوها.

فشار متوسط $\hat{p}(t)$ اندازه‌گیری شده در نقطه مبدأ، برابر با میانگین سیگنال‌های فشار $p_1(t)$ ، $p_2(t)$ است که از دو حسگر فشار نام برده حاصل شده است و رابطه ۱ بیانگر این موضوع است.

$$\hat{p}(t) = \frac{p_1(t) + p_2(t)}{2} \quad (1)$$

سرعت ذرات آکوستیک $u_r(t)$ یک برداری است که در امتداد محور قرار گرفته است، بزرگی این بردار از گرادیان فشار $(p_2(t) - p_1(t))$ با استفاده از روش تقریب تفاضل محدود محاسبه می‌شود. با توجه به رابطه اویلر سرعت ذرات آکوستیک از رابطه زیر محاسبه می‌شود.

$$u_r(t) = - \int_0^T \frac{p_2(t) - p_1(t)}{\rho d} dt \quad (2)$$

که در آن ρ ، T و d به ترتیب بیانگر چگالی هوا، اختلاف زمان و فاصله بین دو حسگر فشار است. d متناسب با پروب‌های مختلف می‌تواند شامل مقادیر مختلفی باشد. شدت صوت لحظه‌ای مطابق با رابطه ۳ به‌عنوان حاصل ضرب فشار و سرعت محاسبه می‌شود [۱۷].

$$I_r(t) = \hat{p}(t) u_r(t) \quad (3)$$

با جایگذاری روابط ۱ و ۲ در رابطه ۳، شدت صوت لحظه‌ای از رابطه زیر قابل محاسبه است.

$$\begin{aligned} I_r(t) &= \frac{1}{2\rho d} \int_0^T [(p_1(t) \\ &+ p_2(t)) (p_1(t) \\ &- p_2(t))] dt \end{aligned} \quad (4)$$

AVS مورد نظر در این مقاله شامل دو پروب شدت است که روی محورهای X و Y قرار گرفته‌اند؛ بنابراین شدت صوت $I_X(t)$ و $I_Y(t)$ در دو جهت اندازه‌گیری می‌شود. زاویه آزیموت φ ، صدای ورودی به‌صورت زیر محاسبه می‌شود.

برای منبع صدا در $P_s(x, y)$ ، مقادیر زاویه آزیموت اندازه‌گیری شده توسط هر حسگر عبارتند از:

$$\varphi_1 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x+s} \right) \quad (6)$$

$$\varphi_2 = \tan^{-1} \left(\frac{y}{x-s} \right) \quad (7)$$

با توجه به دو رابطه ۶ و ۷ موقعیت منبع به صورت زیر به دست می‌آید.

$$x = s \frac{\tan \varphi_2 + \tan \varphi_1}{\tan \varphi_2 - \tan \varphi_1} \quad (8)$$

$$y = 2s \frac{\tan \varphi_1 \tan \varphi_2}{\tan \varphi_2 - \tan \varphi_1} \quad (9)$$

انتخاب فاصله بین حسگرها به صورت تجربی انجام می‌شود. اگر فاصله خیلی کوچک باشد، تفاوت بین مقادیر زاویه آزیموت اندازه‌گیری شده نیز کم می‌شود که با توجه به کوچک شدن مخرج معادلات ۸ و ۹ منجر به خطاهای عددی می‌شود. اگر فاصله دو حسگر خیلی زیاد باشد تفاوت در زمان رسیدن صدا، به یک موضوع مهم تبدیل می‌شود. لازم به ذکر است که حداقل و حداکثر مقدار فاصله بین حسگرها متناسب با تئوری‌های ارائه شده در برخی از مراجع ارائه شده است. همچنین تعیین این فاصله به فرکانس موج نیز بستگی دارد. در بخش بعدی به بررسی تأثیر فاصله بین دو حسگر بر روی خطای اندازه‌گیری شده پرداخته می‌شود.

۲-۳. خطا در تخمین موقعیت منبع صوت

روش توضیح داده شده در بخش قبل شرایط ایده‌آل را در نظر می‌گیرد در صورتی که در شرایط اندازه‌گیری واقعی نقص در حسگرها و مشخصه‌های منابع صدا باعث ایجاد خطا در نتایج اندازه‌گیری شده، می‌شود. در ادامه برخی از عوامل اصلی مؤثر بر دقت اندازه‌گیری مورد بحث قرار می‌گیرند.

- نقص در ساخت هر حسگر AVS: باید اطمینان حاصل کرد که همه حسگرهای فشار در فاصله مساوی از مرکز قرار گرفته‌اند و محورهای تعیین شده توسط حسگرهای

فشار عمودی هستند. به دلیل اندازه کوچک AVS، درجاتی از عدم دقت اجتناب‌ناپذیر است. تفاوت‌های کوچک در محل قرارگیری حسگر ممکن است منجر به خطاهای قابل توجهی در تخمین موقعیت شود. همچنین ممکن است تفاوت‌هایی بین پارامترهای حسگر فشار وجود داشته باشد حتی اگر از یک نوع حسگر فشار استفاده شود. برای جبران تفاوت در دامنه و فاز بین حسگرهای فشار، کالیبراسیون ضروری است.

- ناهماهنگی حسگرها: سیستم مختصات هر دو حسگر باید به گونه‌ای تراز شوند که محورهای X آنها همپوشانی داشته باشند. در غیر این صورت، هر AVS بایاس خود را برای مقادیر زاویه آزیموت اندازه‌گیری شده معرفی می‌کند. برای رفع این مشکل می‌توان یک تصحیح زاویه آزیموت محاسبه کرد.

- ماهیت منبع صدای و فضای اندازه‌گیری: حتی اگر حسگرها به درستی کالیبره و تراز شده باشند، مقداری خطای اندازه‌گیری همیشه در نتیجه وجود دارد که به دلیل ویژگی منبع صدا (اندازه، تغییرات در انرژی صوتی منتشر شده و غیره)، انعکاس صدا در فضای اندازه‌گیری شده و بسیاری دیگر از عوامل ایجاد می‌شود.

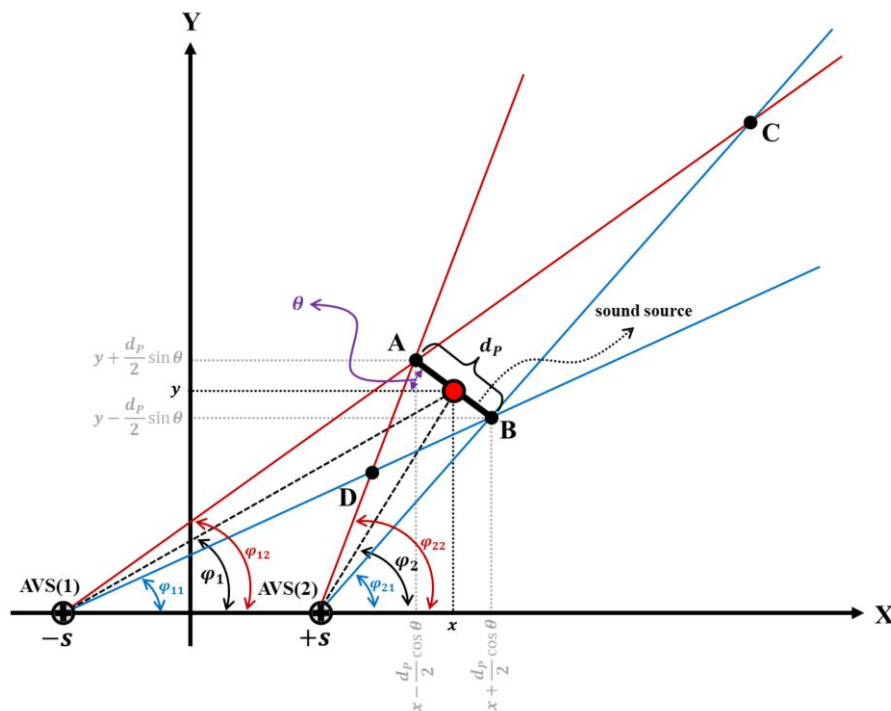
با فرض حسگرهای ایده‌آل و منبع صدای نقطه‌ای، تقاطع پرتوهای DoA موقعیت منبع P_s را نشان می‌دهد. منابع صوتی در واقعیت دارای اندازه غیر صفر d_p هستند. تأثیر اندازه منبع (در این مقاله منظور طول است) بر دقت تخمین فاصله در شکل ۳ نشان داده شده است. با این فرض که کل سطح منبع صوتی انرژی صوتی را به طور یکنواخت ساطع می‌کند و حسگرهای AVS مستقل هستند، موارد زیر ممکن است رخ دهد:

۱. ممکن است هر دو حسگر AVS نقطه مرکزی منبع را نشان دهند (پرتوهای خط‌چین) که این باعث تخمین‌های دقیقی از DoA و فاصله تا منبع می‌شود.

همان‌طور که در شکل ۳ نشان داده شد، تخمین موقعیت منبع وابسته به پارامترهای مختلفی است. با توجه به توضیحات داده شده، تقاطع پرتوهای هر دو حسگر AVS یک نقطه نیست، بلکه ناحیه‌ای به شکل چهارضلعی (ABCD) است که در جهت منبع گسترده‌تر است. در این ناحیه نام برده احتمال حضور جسم وجود دارد و وابسته به اندازه منبع d_p ، فاصله منبع صوت تا حسگرهای AVS، فاصله دو حسگر از یکدیگر و زاویه چرخش منبع صوت θ است.

۲. حسگرهای AVS لبه‌های یکسانی از منبع را نشان می‌دهند (پرتوهای قرمز رنگ لبه A و یا پرتوهای آبی رنگ لبه B)، که تخمین درستی از فاصله و DoA ارائه می‌دهند.

۳. حسگرها لبه‌های مختلف منبع را نشان می‌دهند (پرتو قرمز رنگ و آبی رنگ که لبه C یا D را نشان می‌دهد)، که منجر به قرار گرفتن نقطه تقاطع پرتوها فراتر یا جلوتر از منبع صوت می‌شود و در نتیجه فاصله به درستی تخمین زده نمی‌شود، اما DoA به درستی تشخیص داده می‌شود.



شکل ۳. تأثیر اندازه منبع صدا بر فاصله تخمینی و محیط احتمال حضور منبع صدا.

$$y_B = y - \frac{d_p}{2} \sin \theta$$

برای مختصات نقاط C و D ابتدا باید زاویه‌های φ_{11} ، φ_{12} ، φ_{21} و φ_{22} را به دست آورد که با توجه به روابط مثلثاتی به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$\varphi_{11} = \tan^{-1} \left(\frac{y - \frac{d_p}{2} \sin \theta}{x + s + \frac{d_p}{2} \cos \theta} \right) \quad (12)$$

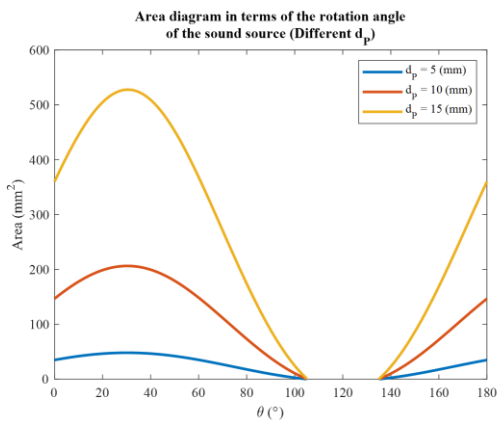
برای محاسبه محیط این ناحیه لازم است مختصات نقاط A، B، C و D به دست آورده شود. با توجه به شکل ۳ مختصات نقاط A و B مشخص بوده و به صورت زیر قابل بیان است.

$$x_A = x - \frac{d_p}{2} \cos \theta \quad (10)$$

$$y_A = y + \frac{d_p}{2} \sin \theta$$

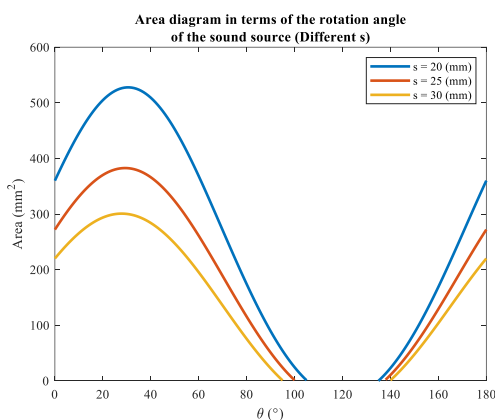
$$x_B = x + \frac{d_p}{2} \cos \theta \quad (11)$$

روی مساحت ناحیه تخمین موقعیت منبع صوتی پرداخته می‌شود. برای منبع صوتی که مختصات مرکز آن $x = 35$ میلی‌متر و $y = 55$ میلی‌متر و $s = 20$ میلی‌متر است، تأثیر زاویه چرخش منبع صوتی بر روی مساحت ناحیه تخمین در اندازه‌های منبع صوتی مختلف در شکل ۴ نشان داده شده است.



شکل ۴. تأثیر زاویه چرخش منبع صوت θ بر روی مساحت ناحیه تخمین در اندازه‌های منبع صوتی مختلف.

برای منبع صوتی در همان مختصات نام برده و با اندازه طول منبع $d_p = 15$ میلی‌متر، تأثیر زاویه چرخش منبع صوتی بر روی مساحت ناحیه تخمین در فاصله‌های مختلف AVS از مبدأ مختصات در شکل ۵ نشان داده شده است.



شکل ۵. تأثیر زاویه چرخش منبع صوتی θ بر روی مساحت ناحیه تخمین در فاصله‌های مختلف AVS از مبدأ مختصات.

$$\varphi_{12} = \tan^{-1} \left(\frac{y + \frac{d_p}{2} \sin \theta}{x + s - \frac{d_p}{2} \cos \theta} \right) \quad (13)$$

$$\varphi_{21} = \tan^{-1} \left(\frac{y - \frac{d_p}{2} \sin \theta}{x - s + \frac{d_p}{2} \cos \theta} \right) \quad (14)$$

$$\varphi_{22} = \tan^{-1} \left(\frac{y + \frac{d_p}{2} \sin \theta}{x - s - \frac{d_p}{2} \cos \theta} \right) \quad (15)$$

با توجه به روابط ۱۲ الی ۱۵ مختصات نقاط C و D به صورت زیر قابل محاسبه است.

$$x_C = s \frac{\tan \varphi_{21} + \tan \varphi_{12}}{\tan \varphi_{21} - \tan \varphi_{12}} \quad (16)$$

$$y_C = 2s \frac{\tan \varphi_{12} \tan \varphi_{21}}{\tan \varphi_{21} - \tan \varphi_{12}}$$

$$x_D = s \frac{\tan \varphi_{22} + \tan \varphi_{11}}{\tan \varphi_{22} - \tan \varphi_{11}} \quad (17)$$

$$y_D = 2s \frac{\tan \varphi_{11} \tan \varphi_{22}}{\tan \varphi_{22} - \tan \varphi_{11}}$$

برای محاسبه مساحت ناحیه ABCD با توجه به مشخص بودن مختصات رأس‌های آن، می‌توان از رابطه زیر استفاده کرد.

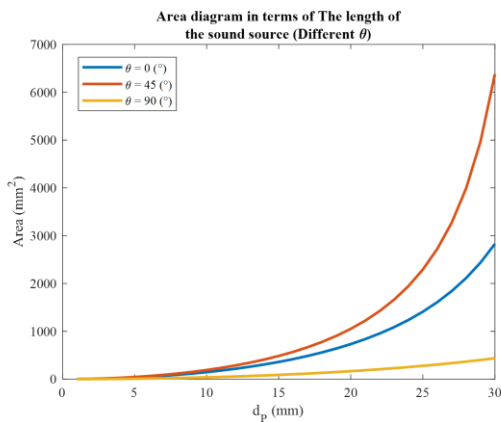
$$\text{Area}_{ABCD} = \frac{1}{2} \{ (x_A y_D + x_D y_B + x_B y_C + x_C y_A) - (x_D y_A + x_B y_D + x_C y_B + x_A y_C) \} \quad (18)$$

در بخش بعدی به بررسی پارامترهای مختلف بر روی مساحت ناحیه تخمین موقعیت منبع صوتی پرداخته می‌شود.

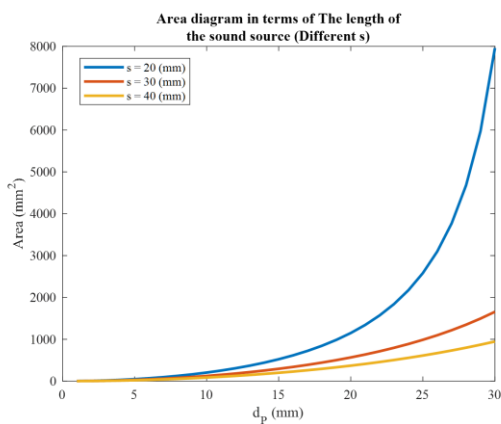
۳. نتایج عددی

همان‌طور که در بخش قبلی نشان داده شد مساحت ناحیه تخمین موقعیت منبع صوتی غیرنقطه‌ای وابسته به عواملی همچون اندازه طول منبع d_p ، فاصله منبع صوت تا حسگرهای AVS، فاصله دو حسگر از یکدیگر و زاویه چرخش منبع صوت θ است. حال به بررسی تأثیر برخی از پارامترهای نام‌برده بر

در شکل ۹ تأثیر اندازه طول منبع صوتی بر روی مساحت ناحیه تخمین در S های مختلف نشان داده شده است. مختصات مرکز منبع صوتی همانند قبل بوده و $\theta = 35$ درجه است.



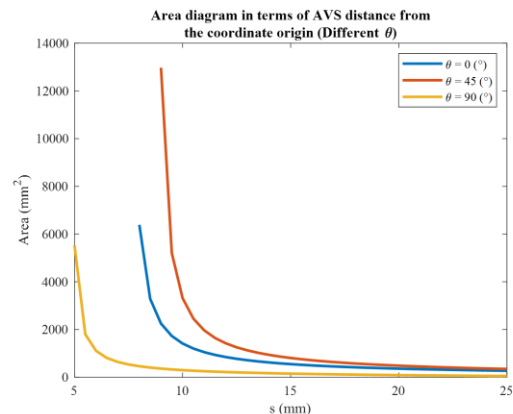
شکل ۸. تأثیر اندازه منبع صوتی بر روی مساحت ناحیه تخمین در θ های مختلف.



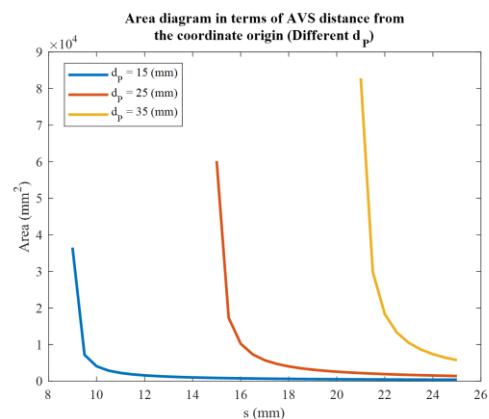
شکل ۹. تأثیر اندازه طول منبع صوتی بر روی مساحت ناحیه تخمین در S های مختلف.

یکی از مهم‌ترین پارامترهای دیگر که نیاز است بررسی شود تأثیر فاصله منبع صوت از AVSها است. برای این منظور در شکل ۱۰ به بررسی تأثیر تغییرات مختصات منبع صوتی در راستای x بر روی ناحیه تخمین در θ های مختلف پرداخته شده است. مقادیر $y = 55$ ، $d_p = 15$ و $s = 20$ میلی‌متر پارامترهای دیگری هستند که در شکل ۱۰ استفاده شده است.

در شکل ۶ و ۷ به ترتیب به بررسی تأثیر فاصله AVS از مبدأ مختصات بر روی مساحت ناحیه تخمین در θ ها و d_p های مختلف پرداخته شده است. لازم به ذکر است مختصات مرکز منبع صوتی همانند سابق بوده و در شکل ۶ $d_p = 15$ میلی‌متر و در شکل ۷، $\theta = 35$ درجه است.



شکل ۶. تأثیر فاصله AVS از مبدأ مختصات بر روی مساحت ناحیه تخمین در θ های مختلف.



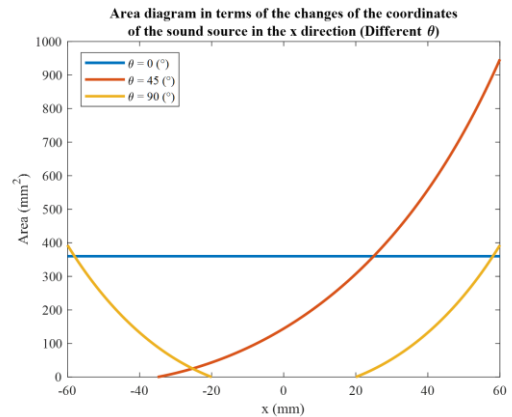
شکل ۷. تأثیر فاصله AVS از مبدأ مختصات بر روی مساحت ناحیه تخمین در d_p های مختلف.

تأثیر اندازه منبع صوتی بر روی مساحت ناحیه تخمین در θ های مختلف در شکل ۸ نشان داده شده است. مختصات مرکز منبع صوت همانند قبل بوده و $s = 20$ میلی‌متر است.

یکسان بوده است. همچنین می‌توان نتیجه گرفت که بهترین θ که در آن ناحیه تبدیل به خط می‌شود (مساحت نزدیک به صفر است) وابسته به d_p نیست و در d_p های مختلف مقداری ثابت دارد ولی با بزرگ شدن S این مقدار کاهش می‌یابد. شکل‌های ۶ و ۷ به‌خوبی به این نکته اشاره می‌کند که در θ ها و d_p های مختلف، با افزایش مقدار S خطای تخمین نیز کاهش می‌یابد ولی متناسب با هر θ و هر d_p این مقدار S متفاوت است. شکل‌های ۸ و ۹ نشان می‌دهد که با افزایش d_p در هر شرایطی خطای تخمین زیاد می‌شود و در مقادیر S های کوچکتر این خطا بیشتر هم می‌شود. همچنین به‌خوبی می‌توان مشاهده کرد که در جایگاه‌هایی که مقدار d_p برابر صفر است دقیقاً منبع صوت مشابه منبع صوت نقطه‌ای می‌شود و در این حالت خطای تخمین موقعیت به صفر می‌رسد. شکل‌های ۶ و ۸ نشان می‌دهند که در θ برابر نود درجه خطای تخمین بسیار کم می‌شود. شکل ۱۰ بیانگر این موضوع است که خطای تخمین جابه‌جایی منبع صوت در راستای x بسیار وابسته به θ است. این موضوع برای جابه‌جایی در راستای y نیز صدق می‌کند.

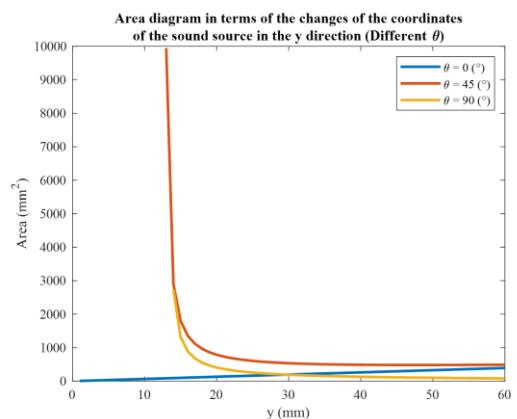
با توجه به نمودارهای نشان داده شده به‌خوبی می‌توان تأثیر پارامترهای مختلف بر روی تخمین موقعیت منبع صوتی غیرنقطه‌ای را مشاهده کرد. نتایج به‌خوبی نشان می‌دهد که با اندازه منبع ثابت که در یک موقعیت ساکن قرار گرفته باشد، مقدار S و θ در تخمین موقعیت منبع تأثیر چشم‌گیری دارد.

راهکارهای مختلفی برای کاهش خطای تخمین می‌توان ارائه کرد. به‌عنوان مثال با جابه‌جایی وضعی AVS ها و یا متغیر بودن مقدار S به‌خوبی می‌توان ناحیه تخمین موقعیت را به حداقل رساند و شناسایی به‌خوبی انجام پذیرد در ضمن با تعریف توابع هزینه مناسب و استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی می‌توان بهترین پارامترها را در تعیین کمترین خطا استخراج کرد که این مورد خارج از چارچوب این مقاله است. روش دیگر استفاده از تعداد بیشتری از حسگرهای بردار صوتی



شکل ۱۰. تأثیر تغییرات مختصات منبع صوتی در راستای x بر روی ناحیه تخمین در θ های مختلف.

در شکل ۱۱ به بررسی تأثیر تغییرات مختصات منبع صوتی در راستای y بر روی ناحیه تخمین در θ های مختلف پرداخته شده است. پارامترهای دیگری که در شکل ۱۱ استفاده شده است، $x = 35$ ، $d_p = 15$ و $S = 20$ میلی‌متر هستند.



شکل ۱۱. تأثیر تغییرات مختصات منبع صوتی در راستای y بر روی ناحیه تخمین در θ های مختلف.

۴. بحث و نتیجه‌گیری

در بخش قبلی نتایج عددی و نمودارهای مربوطه ارائه شده است. همان‌طور که در شکل‌های ۴ و ۵ مشاهده شد با افزایش θ مساحت ناحیه تخمین نیز افزایش می‌یابد و در مقابل خطای تخمین موقعیت نیز افزایش می‌یابد. این افزایش θ تا نقطه‌ای به اوج خود می‌رسد که این نقطه در d_p ها و S های مختلف

است که این ملزم به پژوهش و تحقیقات بیشتری است که در کارهای آینده می‌توان به آنها پرداخته شود. این نکته قابل بیان است که لزوماً افزایش تعداد حسگرها، دقت و کارایی این

تئوری را افزایش نمی‌دهد، بلکه می‌تواند باعث پیچیده‌تر شدن حل و ناکارآمدی آن شود.

۵. مآخذ

- [1] Kotus, Jozef, "Application of passive acoustic radar to automatic localization, tracking and classification of sound sources", In *2010 2nd International Conference on Information Technology, (2010 ICIT)*, IEEE, 2010, pp.67-70
- [2] Kotus, Józef, "Multiple sound sources localization in free field using acoustic vector sensor", *Multimedia tools and applications*, 2015, Vol.74, pp.4235-4251.
- [3] Lopatka, Kuba, Jozef Kotus, and Andrzej Czyzewski, "Detection, classification and localization of acoustic events in the presence of background noise for acoustic surveillance of hazardous situations", *Multimedia Tools and Applications*, 2016, Vol.75, pp.10407-10439.
- [4] Vashkevich, Maxim, Elias Azarov, Alexander Petrovsky, and Yuliya Rushkevich, "Features extraction for the automatic detection of ALS disease from acoustic speech signals", In *2018 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, IEEE 2018, pp.321-326.
- [5] Moschioni, Giovanni, Bortolino Saggin, and Marco Tarabini, "Sound source identification using coherence-and intensity-based methods", *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2007, Vol.56, no.6, pp.2478-2485.
- [6] Gunel, Banu, Huseyin Hacihabiboglu, and Ahmet M. Kondo, "Intensity vector direction exploitation for exhaustive blind source separation of convolutive mixtures", In *2009 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE, 2009, pp.41-44.
- [7] Zhong, Xionghu, Xiaoyi Chen, Wenwu Wang, Atiyeh Alinaghi, and A. Benjamin Premkumar, "Acoustic vector sensor based reverberant speech separation with probabilistic time-frequency masking", In *21st European Signal Processing Conference (EUSIPCO 2013)*, IEEE, 2013, pp.1-5.
- [8] Zou, Yue Xian, Wei Shi, Bo Li, Christian H. Ritz, Muawiyath Shujau, and Jiangtao Xi, "Multisource DOA estimation based on time-frequency sparsity and joint inter-sensor data ratio with single acoustic vector sensor", In *2013 IEEE International Conference on Acoustics, Speech and Signal Processing*, IEEE, 2013, pp.4011-4015.
- [9] Kotus, Jozef, Andrzej Czyzewski, and Bożena Kostek, "3D acoustic field intensity probe design and measurements", *Archives of Acoustics*, 2016, Vol.41, no.4, pp.701-711.
- [10] Szwoch, Grzegorz, and Józef Kotus, "Detection of the incoming sound direction employing MEMS microphones and the DSP", In *Multimedia Communications, Services and Security: 9th International Conference, MCSS 2017, Kraków, Poland, November 16-17, 2017, Proceedings 9*, Springer International Publishing, 2017, pp.186-198.
- [11] Wajid, Mohd, Arun Kumar, and Rajendar Bahl, "Design and analysis of air acoustic vector-sensor configurations for two-dimensional geometry", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2016, Vol.139, no.5, pp.2815-2832.

- [12] Kotus, Józef, and Grzegorz Szwoch, "Calibration of acoustic vector sensor based on MEMS microphones for DOA estimation", *Applied Acoustics*, 2018, Vol.141, pp.307-321.
- [13] Gade, Svend, Jørgen Hald, Jesper Gomes, Gijs Dirks, and Bernard Ginn, "Recent advances in moving-source beamforming", *Sound Vibration*, 2015, p.9.
- [14] Wind, Jelmer, Emiel Tijs, and Hans-Elias de Bree, "Source localization using acoustic vector sensors: A MUSIC approach", In *Novem2009: Noise and Vibration: Emerging Methods*, ISVR, 2009, pp.1-10.
- [15] Padois, Thomas, "Acoustic source localization based on the generalized cross-correlation and the generalized mean with few microphones", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2018, EL393-EL398, Vol.143, no.5.
- [16] Cao, Jiuwen, Jun Liu, Jianzhong Wang, and Xiaoping Lai, "Acoustic vector sensor: reviews and future perspectives", *IET Signal Processing*, 2017, Vol.11, no.1, pp.1-9.
- [17] Jacobsen, Finn, "Sound intensity and its measurement and applications", *Current topics in acoustical research*, 2003, Vol.3, 87-91.
- [18] De Bree, Hans-Elias, "The Microflown: An acoustic particle velocity sensor", *Acoustics Australia*, 2003, Vol.31, no.3, pp.91-94.
- [19] Jacobsen, Finn, and Hans-Elias de Bree, "A comparison of two different sound intensity measurement principles", *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2005, Vol.118, no.3, pp.1510-1517.
- [20] Yin, Junhui, Chao Xiong, and Wenjie Wang, "Acoustic localization for a moving source based on cross array azimuth", *Applied Sciences*, 2018, Vol.8, no.8, p.1281.
- [21] Kotus, Józef, and Grzegorz Szwoch, "Localization of sound sources with dual acoustic vector sensor", In *2019 Signal Processing: Algorithms, Architectures, Arrangements, and Applications (SPA)*, IEEE, 2019, pp.44-49.

پی نوشت:

1. Acoustic Vector Sensor
2. Direction Of Arrival
3. Beamformer
4. Multiple Signal Classification
5. Generalized Cross Correlation
6. Azimuth Angle